

塩水貯留量が円筒型太陽熱淡水化装置(TSS)の造水性能に及ぼす影響

寺崎 寛章* 山路 昂央** 福原 輝幸*

Effects of Saline-Water Volume on Production Performance of Tubular Solar Still

Hiroaki TERASAKI*, Takahiro YAMAJI** and Teruyuki FUKUHARA*

(Received February 8, 2013)

A solar still can make distilled water, not only while daytime, also after sunset due to remaining solar heat (designated as production inertia). In order to better understand the production inertia, we measured the production, evaporation and temperatures in a Tubular Solar Still (TSS) by turning infrared lamps on and off under three different radiant intensity, R_s , and two different water depths in a trough, H_w (amount of supplied water). The amount of production due to the production inertia, M_{pi} , after six hours of infrared heating, was about from three to four times greater for $H_w=0.04\text{m}$ than for $H_w=0.01\text{m}$, regardless of R_s . This result may be caused by the fact, evaporation from the water surface during the production inertia was relatively greater for $H_w=0.04\text{m}$ because the water temperature fell more slowly for $H_w=0.04\text{m}$ than for $H_w=0.01\text{m}$. Furthermore, the ratio of M_{pi} to the total production over the experiment became large with the decrease in R_s . It could be seen that the effect of the production inertia on the daily production of the TSS cannot be disregarded.

Key Words : Tubular Solar Still, production inertia, solar energy, desalination, evaporation, production

1. はじめに

近年,世界的に深刻化している環境問題の一つに,飲料水不足が挙げられる.この問題の背景には水資源の枯渇だけでなく,水質汚染の拡大や公衆衛生施設の未整備などがあり,多くの人々が不衛生な水の飲用を余儀なくされている.世界保健機構(WHO)の報告によると,安全な飲料水確保が難しい発展途上国および貧困国では,不衛生な水の飲用が疾病原因の約80%を占めており,年間約1700万人以上がコレラや腸チフスなどを発病し,そのうち約170万人が命を落としている^{1),2)}.従って,一日も早く飲料水不足の対策を講じる必要がある.

その一つとして,海水から淡水を製造する淡水化が挙げられる(表1を参照).例えば,多段フラッシュ

法(MSF)^{3),4)}は海水を沸騰・蒸発させ,発生した蒸気を凝縮させることにより淡水を得る手法で,最も高い造水能力を有しており,世界最大のシェア(特に湾岸諸国では約80%)を誇る.逆浸透膜法(RO)^{5),6)}は加圧した海水を半透膜に供給し,淡水を得る手法で,MSFに比べると建設費やエネルギー消費は少ないが,海水による膜汚染を少なくするための前処理が必要となる.多重効用法(MED)⁷⁾はMSFと同じ蒸発法に分類されるものの,MSFと比して環境に与える温排水負荷が比較的に少ないことからMSFに代わる次世代の蒸発法として期待が寄せられている.また,イオン交換樹脂法(IER)⁸⁾は膜状イオン交換樹脂に海水を通過させて,淡水を製造する手法であるが,交換容量に制限があるため連続稼働出来ない.そこで,その課題を解決するために電気透析法(ED)⁹⁾と組合せた装置の開発が進められている.これらの淡水化手法は中東を中心に使われており,一日に大量の造水が可能であり,飲料水不足解決に大きく貢献している.

しかしながら,これらの淡水化装置は高い技術力

* 福井大学大学院工学研究科

** 福井大学大学院工学研究科建築建設工学工学専攻

* Dept. of Architecture and Civil Engineering

** Architecture and Civil Engineering Course,
Graduate School of Engineering

と適切な維持管理に加えて、大量のエネルギーを必要とするため、インフラ整備が不十分な発展途上国および貧困国、あるいは電力供給が不安定な国での普及は困難である。

一方で造水能力は低いものの、太陽エネルギーのみを使って蒸留水を製造する太陽熱淡水化装置の研究が進められており、代表的なものに水盤型太陽熱淡水化装置¹⁰⁾がある。例えば、田中ら¹¹⁾は三角形屋根を持つ水盤型装置のカバーを冷却した場合、造水量が増すことを示した。しかしながら、ガラス製カバーを使用しているため、装置の高コスト化およびカバーが破損し易いなどの課題を有する。伊良部ら¹²⁾は装置下部に凹反射板を設置した下方集熱方式の太陽熱淡水化装置を提案したが、従来の水盤型に比べ構造が複雑化しており、実用化には至っていない。

筆者らは円筒型太陽熱淡水化装置 (Tubular Solar Still, TSS)¹³⁾を提案し、その造水性能を調べている(図1を参照)。TSSの主な特徴は筆者らによって述べられている¹⁴⁾。

既往のTSSの研究では、Islam et al.¹⁵⁾がTSS内の熱収支に水蒸気の質量収支を考慮した造水モデルを構築し、蒸発量およびTSS内温度の変化を再現した。さらにAmimul et al.¹⁶⁾は、Islam et al.のモデルを改良し、凝縮過程を含めた造水モデルを構築した。また、寺崎ら¹⁷⁾は実用面から日造水量と日積算日射量の相関関係を定量評価した。

このように、従来の研究の多くは造水機構の解明や装置の工夫、造水量の改善に着目してきた。しかしながら、今後、太陽熱淡水化の実用化を目指すに

は造水性能の低さと造水価格に鑑み、利用場所および利用目的を明確にする必要がある。加えて、従来十分に議論されてこなかった維持管理の観点から、太陽熱淡水化装置への給水頻度を規定するトラフへの供給水量の最適化に関する検討が重要となる。その際、日没後も造水が続く(筆者らはこれを造水慣性と呼称)ことから、トラフへの供給水量(初期水深)と日造水量の関係および日造水量に及ぼす造水慣性の影響を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、造水慣性の特性を明らかにすることを主たる目的として、初期水深が異なるTSS内の熱・水分移動および造水量をヒートランプ照射から消灯後にわたって調べたので、その結果をここに報告する。

2. 実験概要

室内造水実験は福井大学内の恒温恒湿室(温度:25°C, 湿度:50%)にて、TSS(長さ:0.60m, 直径:0.20m)および黒色のアクリル製矩形トラフ(内法:0.50×0.10m, 高さ:0.065m)を用いて行われた。TSSはヒートランプおよびTSS本体を固定するためのフレーム(内法:1.5×0.6m, 高さ:1.8m)中央に設置し、トラフ内の水(トラフ水と呼称)の蒸発を促進するため、TSS上方にヒートランプを4基設置した(図2を参照)。

実験ではTSS周辺温度 T_a (°C)、円筒カバー温度 T_c (°C)およびトラフ内水温 T_w (°C)を熱電対により、TSS内湿り空気の温度 T_{ha} (°C)および相対湿度 R_{ha} (%)を温湿度センサー(Vaisala製)により、それぞれ

表1 既往の淡水化装置

淡水化手法	最大規模の造水能力 ^{4),6)}	シェア率 ⁴⁾	環境負荷	備考 ^{4),5)}
多段フラッシュ法(MSF)	100 万 m ³ /日	46%	非常に大きい	電力コストが高く、装置は大規模
逆浸透膜法(RO)	33 万 m ³ /日	43%	大きい	膜は汚れ易く、海水の前処理が必要
多重効用法(MED)	27 万 m ³ /日	6%	大きい	MSFより省エネルギーで低環境負荷
円筒型太陽熱淡水化(TSS)	0.001m ³ /日	—	非常に小さい	太陽エネルギーを使用し、作製が容易

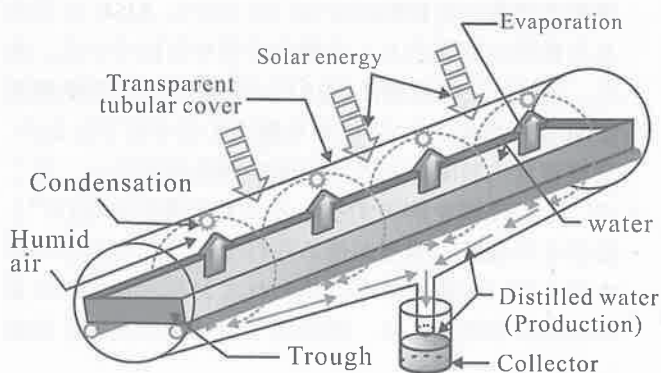


図1 円筒型太陽熱淡水化装置(TSS)概要

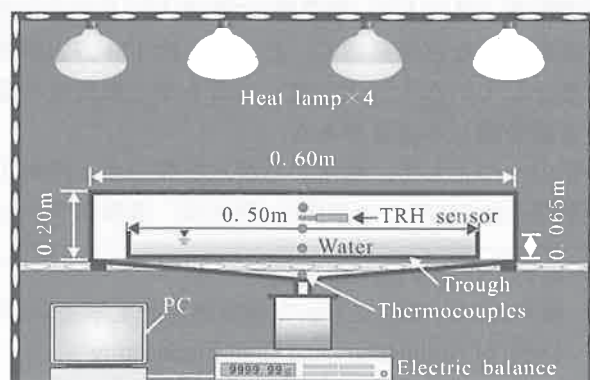


図2 実験装置概要

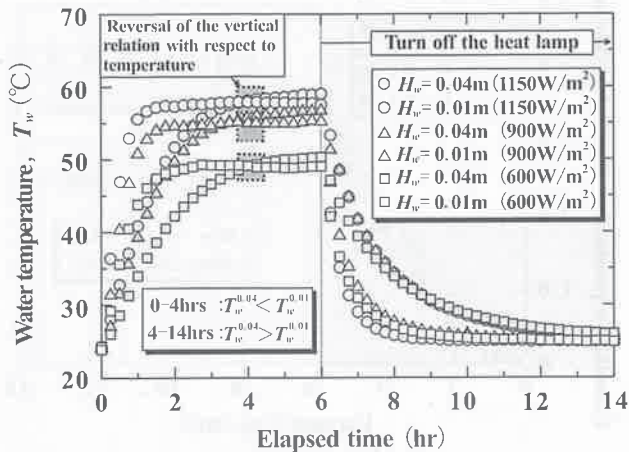


図3 水温の経時変化

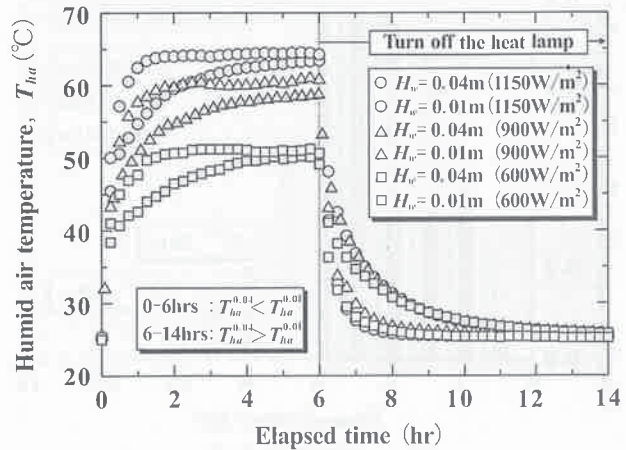


図4 湿り空気温度の経時変化

れ測定した。 T_c はカバーの外周に沿って 45° 毎に測定された計 5ヶ所の平均値を、 T_w は半水深で測定された値を、 T_{ha} および R_{ha} は TSS 中央のカバー上端から下方 0.05m で測定された値を、それぞれ用いた。また、時間蒸発密度 M_{he} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{hr}$) はカメラにより撮影された画像の解析に基づくトラフ内水深の減少分より、時間造水密度 M_{hp} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{hr}$) は集水器の質量増加分より、それぞれ求めた。

次に、実験手順について述べる。

- 1) 実験開始前のトラフおよび集水器の質量を最小読み $1/100\text{g}$ の重量計 (Mettler Toledo製) でそれぞれ測定する
- 2) 初期水深 H_w (m) が 0.04m または 0.01m となるようにトラフに室温と等しい淡水を供給し、トラフを TSS 内に挿入後、TSS の両端を密閉する
- 3) TSS 上端でのヒートランプ照射強度 R_s (W/m^2) が 1150 、 900 または $600\text{W}/\text{m}^2$ となるようにヒートランプの高さを調整した後、6時間照射して蒸発を促進させる
- 4) 照射終了 (消灯) 後、造水が確認できなくなるまで実験を継続する
- 5) 実験終了後、吸水紙を用いてカバー内側の水滴を採取する。

上述の実験手順により、 H_w と R_s を変えた 6 ケースの実験をそれぞれ 2 回ずつ行った。

3. 実験結果

3.1 水温

トラフからの蒸発量はトラフ水面と TSS 内湿り空気の水蒸気密度差に比例する¹⁵⁾と考えられる。そこでトラフ水面の水蒸気密度を規定するトラフ内水温 T_w ($^\circ\text{C}$) に注目し、 T_w の変動を明らかにする。

図 3 は T_w ($T_w^{0.04}$ および $T_w^{0.01}$) の経時変化を示す。

ここに、 $T_w^{0.04}$ は $H_w=0.04\text{m}$ の T_w 、 $T_w^{0.01}$ は $H_w=0.01\text{m}$ の T_w である。以後、上添字は初期水深を意味する。

照射前の全ての実験ケースで T_w は約 25°C であった。照射開始直後から $T_w^{0.01}$ は R_s が 1150 、 900 、 $600\text{W}/\text{m}^2$ の順に上昇し始め、最高水温 $T_{w\max}^{0.01}$ はそれぞれ 58°C 、 54°C 、 49°C に達した。また、温度上昇から T_w がほぼ一定になるまでの時間 t_{eq} は、 $R_s = 1150\text{W}/\text{m}^2$ で 1 時間 20 分、 $900\text{W}/\text{m}^2$ で 2 時間 10 分、 $600\text{W}/\text{m}^2$ で 3 時間 25 分となり、 R_s が小さいほど長くなった。

一方、 $T_w^{0.04}$ は $T_w^{0.01}$ と同様に照射直後から上昇するが、 $H_w=0.01\text{m}$ よりも $H_w=0.04\text{m}$ の方がトラフ水の内部エネルギーが大きいいため、 $T_w^{0.04}$ の上昇率は $T_w^{0.01}$ のそれより小さい。また、照射期間中の $T_w^{0.04}$ は緩やかに上昇し続けた。なお、 $T_{w\max}^{0.04}$ は $R_s = 1150\text{W}/\text{m}^2$ で 59°C 、 $900\text{W}/\text{m}^2$ で 56°C 、 $600\text{W}/\text{m}^2$ で 50°C となり、 R_s に関わらず $T_{w\max}^{0.04} > T_{w\max}^{0.01}$ であった。

また消灯後、 T_w は低下するものの、 R_s に関わらず H_w が大きいほど、消灯から造水が観られなくなるまでの時間 t_{end} は長くなった。これは消灯後のトラフ水の内部熱エネルギーが H_w に比例して大きく、冷め難いことに起因すると推察される。なお、 $t_{end}^{0.04} / t_{end}^{0.01} \approx 3$ であった。

3.2 湿り空気温度

湿り空気温度 T_{ha} ($^\circ\text{C}$) はトラフからの蒸発量のみならず、カバー内面での凝縮量 (TSS 内湿り空気とカバー内面の水蒸気密度差に比例¹⁵⁾) にも影響を及ぼす。 T_{ha} による湿り空気の相対湿度の変化が小さい場合、 T_{ha} が高くなると蒸発は抑制される一方、凝縮は促進されることが予想される。そのため、照射終了後の T_{ha} の低下を吟味することは、造水慣性と H_w の関係を明らかにするために不可欠である。

図 4 は T_{ha} の経時変化を示す。 T_{ha} の経時変化および R_s と H_w による T_{ha} の大小関係は T_w と同様の傾向

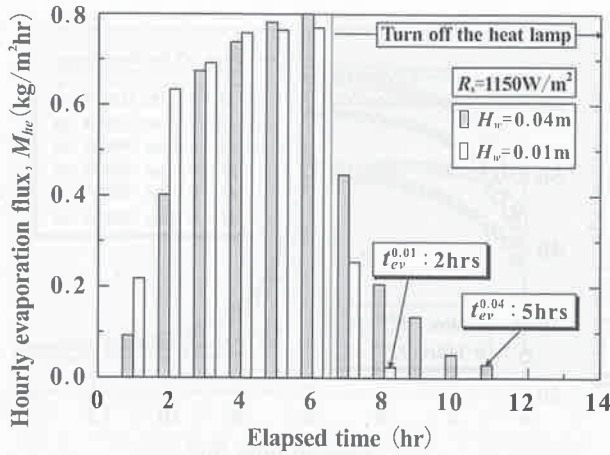


図5 時間蒸発密度

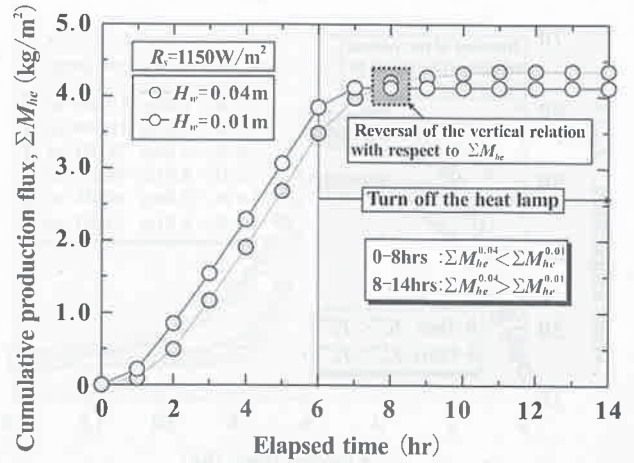


図6 積算蒸発密度

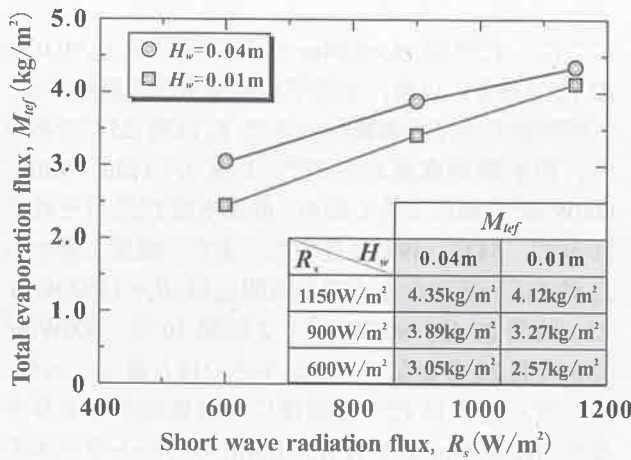


図7 全蒸発密度と照射強度の関係

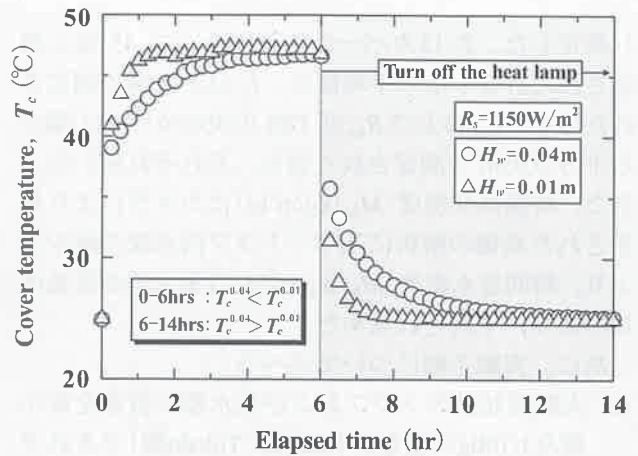


図8 カバー温度の経時変化

を呈したが、湿り空気の高温度 T_{hamax} は $T_{hamax}^{0.01} > T_{hamax}^{0.04}$ であった。 T_{ha} の t_{eq} 後から消灯までの間における $H_w = 0.01\text{m}$ の T_{ha} と T_w の平均温度差 $\Delta T_{ha-w}^{0.01}$ は、 $R_s = 1150\text{W/m}^2$ で 6°C 、 900W/m^2 で 4°C 、 600W/m^2 で 2°C となり、 R_s の減少に伴い小さくなった。また、各 R_s に対する T_{ha} の $t_{eq}^{0.01}$ は、 $T_w^{0.01}$ のそれと一致した。なお、消灯後の T_{ha} の時間的低下は T_w と同様に H_w が大きいほど緩やかであった。

3.3 蒸発密度

図5は $R_s = 1150\text{W/m}^2$ における時間蒸発密度(トラフ水表面積当りの時間蒸発量) M_{he} ($\text{kg/m}^2\text{hr}$) の経時変化をそれぞれ示す。全てのケースで照射開始から1時間後には蒸発量が確認でき、時間の経過に伴い M_{he} は増大した。照射開始から4時間までは、 $M_{he}^{0.01}$ の方が $M_{he}^{0.04}$ より大きいものの、照射開始5時間後に逆転した。

消灯後の M_{he} の低下は $H_w = 0.04\text{m}$ よりも $H_w = 0.01\text{m}$ の方が著しい。従って、蒸発継続時間 $t_{ev}^{0.01}$ は $t_{ev}^{0.04}$ よりも短く、それぞれ2および5時間であった。この消灯後も蒸発が続く現象(蒸発慣性と呼称)の違いは

$H_w = 0.04\text{m}$ の方が $H_w = 0.01\text{m}$ よりも T_w が低下し難いことに起因する。

図6は $R_s = 1150\text{W/m}^2$ における積算蒸発密度 ΣM_{he} (kg/m^2) の経時変化を示す。照射開始後の M_{he} の差に起因して、照射開始から7時間までは $\Sigma M_{he}^{0.01}$ の方が $\Sigma M_{he}^{0.04}$ よりも大きい、その後の蒸発慣性により、照射開始から8時間後、 ΣM_{he} の大小関係は逆転した。なお、 R_s に関わらず実験終了後の $\Sigma M_{he}^{0.04}$ は $\Sigma M_{he}^{0.01}$ よりも大きくなった。

最後に図7は実験期間中の蒸発密度(全蒸発密度) M_{tef} (kg/m^2) と R_s の関係を H_w 毎に示す。 M_{tef} は H_w に関係なく R_s とともに増大する。また、 H_w の違いによる M_{tef} の差 $\Delta M_{tef} (= M_{tef}^{0.04} - M_{tef}^{0.01})$ は、 R_s が大きくなるにつれて小さくなった。

3.4 カバー温度

カバー温度 T_c ($^\circ\text{C}$) は3.2で述べたようにTSS内の凝縮量に因るため、 T_w および T_{ha} とどのように連動して変化するかが重要となる。

図8は $R_s = 1150\text{W/m}^2$ における T_c の経時変化を示す。照射開始後、 T_w および T_{ha} と同様に急上昇した。

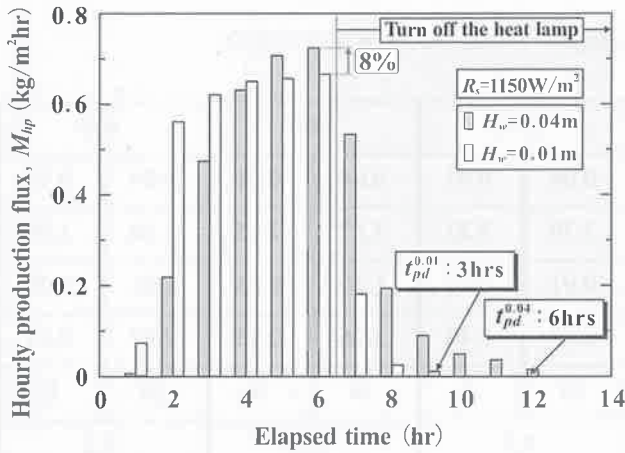


図9 時間造水密度

表2 水収支 ($R_s=1150\text{W/m}^2$)

初期水深 H_w	m	0.04	0.01
蒸発量 M_{ev}	kg	0.218	0.206
造水量 M_{pr}	kg	0.185	0.172
TSS 内水滴量 M_v	kg	0.009	0.008
漏気量 M_{miss}	kg	0.024	0.026
誤差 (M_{miss}/M_{ev})	%	11	12

また、照射期間における $H_w=0.01\text{m}$ は1時間30分後にほぼ一定になったものの、 $H_w=0.04\text{m}$ は T_{ha} と同様に緩やかに上昇を続けた。これは T_{ha} の影響を受けているものと推察される。

3.5 造水密度

図9は $R_s=1150\text{W/m}^2$ における時間造水密度(トラフ水表面積当りの時間造水量) M_{hp} ($\text{kg/m}^2\text{hr}$) の経時変化を示す。 M_{he} と同様に照射開始から1時間以内に、両 H_w で造水が確認された。照射開始から4時間までは、 $M_{hp}^{0.01} > M_{hp}^{0.04}$ であったが、その後は $M_{hp}^{0.04} > M_{hp}^{0.01}$ となり、時間最大造水密度 $M_{hpmax}^{0.04}$ は $M_{hpmax}^{0.01}$ のそれよりも約8%大きくなった。なお、本文中には示さないが、上述した M_{hp} の特性は、 R_s が異なる場合においても同様であった。

消灯後、 M_{he} と同様に M_{hp} は低下するものの、その時間低下率は $M_{hp}^{0.04}$ の方が $M_{hp}^{0.01}$ のそれよりも小さい。また、消灯後の造水継続時間(造水慣性時間) $t_{pd}^{0.04}$ および $t_{pd}^{0.01}$ は、それぞれ6および3時間となり、造水慣性は $M_{hp}^{0.04}$ の方で明瞭となった。

以上より、造水特性はトラフからの蒸発慣性の影響を大きく受けることが確認された。

図10は積算造水密度 ΣM_{hp} (kg/m^2) の経時変化を示す。照射直後は H_w が小さく、かつ R_s が大きいほど、

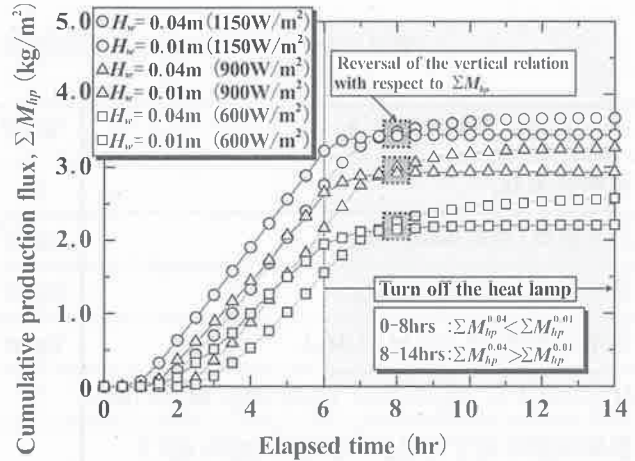


図10 積算造水密度

ΣM_{hp} は急激に増加した。その後、 ΣM_{hp} は H_w および R_s に関わらず照射終了までの間、概ね線形的に増加した。

消灯後は R_s に関わらず、 $\Sigma M_{hp}^{0.01}$ に比べて $\Sigma M_{hp}^{0.04}$ の増加が明瞭となる。 H_w の違いによる実験期間中の造水密度(全造水密度) M_{pf} (kg/m^2) の差 ΔM_{pf} ($=M_{pf}^{0.04} - M_{pf}^{0.01}$) は、 ΔM_{ref} と同じく R_s が大きいほど小さくなる。これより改めて蒸発量と造水量の密接な関係が理解できる。

3.6 水収支

TSS の水収支は装置からの漏気を考慮すると、式(1)で表される。

$$M_{ev} = M_{pr} + M_v + \Delta M_{vha} + M_{miss} \quad (1)$$

ここに、 M_{ev} は蒸発量(kg)、 M_{pr} は造水量(kg)、 M_v はTSS 内水滴量(kg)、 ΔM_{vha} は湿り空気中の水蒸気の実験初期からの増分量(kg)および M_{miss} は漏気量を意味する。なお、 M_{miss} はTSS内に設置した計測機器周辺からの漏気によって失われた水蒸気量である。また、 ΔM_{vha} は式(1)中の他項に比して非常に小さいために無視した。

表2は実験終了時の $R_s=1150\text{W/m}^2$ に対する $H_w=0.04$ および $H_w=0.01\text{m}$ の水収支を示す。表中には示していないが、 R_s に関わらず、蒸発量の約9~12%の水が造水に関与することなく失われた。

3.7 造水慣性の特性

表3は M_{pf} (kg/m^2) に対する消灯後から実験終了時まで(消灯期間)の造水密度 M_{pi} (kg/m^2) の割合 R_{pi} ($=M_{pi}/M_{pf} \times 100$) を、 R_s 毎に比較したものである。

造水慣性の指標の一つである R_{pi} は、 $H_w=0.04$ および 0.01m に対して $R_s=1150\text{W/m}^2$ で25および6%、 900W/m^2 で34および9%、さらに 600W/m^2 で39および12%であり、 H_w に対する R_{pi} の比 R_c ($=R_{pi}^{0.04}/R_{pi}^{0.01}$)

表3 全造水密度に対する消灯後から実験終了時までの造水密度の割合

ヒートランプ照射強度 R_s	W/m ²	1150		900		600	
初期水深 H_w	m	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01
造水密度(照射期間) M_{pf}	kg/m ²	2.79	3.22	2.17	2.65	1.56	1.95
造水密度(消灯期間) M_{pi}	kg/m ²	0.91	0.22	1.10	0.25	1.01	0.26
全造水密度 $M_{tpf}(=M_{pf}+M_{pi})$	kg/m ²	3.70	3.44	3.26	2.93	2.57	2.21
M_{pi} に対する M_{pf} の割合 $R_{pf}(=M_{pi}/M_{tpf}\times 100)$	%	25	6	34	9	39	12
初期水深に対する R_{pf} の比 $R_c(=R_{pf}^{0.04}/R_{pf}^{0.01})$	—	4.2		3.8		3.3	
造水慣性時間 t_{pd}	hr	6.0	3.0	6.5	3.0	6.5	3.0
造水慣性時間の比 $R_t(=t_{pd}^{0.04}/t_{pd}^{0.01})$	—	2.0		2.2		2.2	

は 3.2~4.2 となった。なお、 $t_{pd}^{0.04}$ および $t_{pd}^{0.01}$ は、 $R_s=1150\text{W/m}^2$ で 6.0 および 3.0 時間、 900W/m^2 で 6.5 および 3.0 時間、さらに 600W/m^2 で 6.5 および 3.0 時間であり、造水慣性時間の比 $R_t(=t_{pd}^{0.04}/t_{pd}^{0.01})$ は 2.0 ~ 2.2 となり、造水慣性は $H_w = 0.01\text{m}$ よりも $H_w = 0.04\text{m}$ でより顕著に現れた。

4. おわりに

本研究では、TSS の維持管理の適正化を検討する前段として、トラフへの供給水量(初期水深 H_w)およびヒートランプ照射強度 R_s を変えて、円筒型太陽熱淡水化装置(TSS)の造水がヒートランプ消灯後も続く現象(造水慣性)の特性を調べた。

その結果を以下に列挙する。

- (1) R_s に関わらず全造水密度、時間最大蒸発密度および時間最大造水密度は、 $H_w=0.04\text{m}$ の方が $H_w=0.01\text{m}$ のそれよりも大きい。
- (2) 消灯後の水温および時間蒸発密度の時間低下は、 $H_w=0.04\text{m}$ の方が $H_w=0.01\text{m}$ よりも緩やかとなる。
- (3) (2)に起因して、 H_w が大きいほど造水継続時間は長く、全造水密度に対する消灯後から実験終了後までの造水密度の割合は大きくなり、造水慣性は顕著となる。
- (4) 造水慣性に及ぼす R_s の影響は、 R_s が小さく、また H_w が大きいほど明瞭となる。

今後は本実験結果を基に漏気を考慮した TSS 内の熱・水分移動モデルを構築するとともに、熱・水分移動パラメーターの再検討および補正を行う。

参考文献

- [1] 佐々木洋介：途上国の水問題と対策について，日本機械工学，Vol. 112，pp. 26-27，2009.
- [2] ロビン・クラーク：水の世界地図，沖大幹，沖明訳，丸善株式会社，pp. 11-49，2006.
- [3] Darwish, M.A, El-Refae, M.M. and Abdel-Jawad, M.: Developments in the multi-stage flash desalting system, *Desalination*, Vol. 100, pp. 35-64, 1995.
- [4] 海外における水ビジネス最前線 水の関連産業の動向・海水淡水技術・水の循環および排水再利用技術，株式会社エヌ・ティー・エス，pp. 43-135，2009.
- [5] 水と水技術，株式会社オーム，No. 8，pp. 9-11，2011.
- [6] 小西貴久：世界の水不足に取り組む膜分離技術，日本化学学会，化学と教育，Vol. 59, No. 5，pp. 274-277，2011.
- [7] スティーブン・ホフマン：水ビジネスの世界—ポスト石油時代の投資戦略，種本廣之訳，株式会社オーム社，pp. 230，2011.
- [8] 水と水技術，株式会社オーム，No. 9，pp. 11-45，2011.
- [9] 佐藤利夫，大家晴彦：イオン交換膜電気透析法を用いた新しい殺菌法，日本鉄鋼協会々誌，Vol. 76, No. 9，pp. 41-46，1990.
- [10] 永井二郎，福原輝幸，浅野文郎：UAEにおける太陽熱淡水化の開発，日本機械学会熱工学コンファレンス 2003 講演論文集，No. 03-30，pp. 339-340，2003.

- [11] 田中大, 平瀆国男, 野底武浩, 長田孝志, 工藤鴻基: 太陽熱海水淡水化蒸留器の実用化への挑戦, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, No. 02-22, pp. 65-66, 2002.
- [12] 伊良部邦夫, 新垣洋作, 照屋功, 原田周作: 太陽熱利用による海水淡水化装置の開発, 日本機械学会講演論文集, No. 048-1, pp. 199-200, 2004.
- [13] Islam, K.M.S, Fukuhara, T. and Asano, F.: Mass transfer in tubular solar still, 土木学会第59回年次学術講演概要集, Vol. 59/VII-236, pp. 471-472, 2004.
- [14] 山路昂央, 寺崎寛章, 福原輝幸, 石井義裕: 円筒型太陽熱淡水化装置(TSS)の造水性能に及ぼす外気温の影響, 土木学会第67回年次学術講演概要集, Vol. 67/VII-001, pp. 1-2, 2012.
- [15] Islam, K.M.S. and Fukuhara, T.: Heat and mass transfer in tubular solar still under steady condition, *Annul Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 49, pp. 727-732, 2005.
- [16] Amimul, A. and Fukuhara, T.: Condensation mass transfer in unsaturated humid air inside tubular solar still, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 28, pp. 31-42, 2010.
- [17] 寺崎寛章, 山路昂央, 草間政寛, 福原輝幸: アラブ首長国連邦における円筒型太陽熱淡水化装置(TSS)の造水性能評価, 土木学会第66回年次学術講演概要集, Vol. 66/VII-003, pp. 5-6, 2011.

